

高等学校教学用书

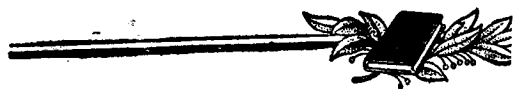


空气动力学

H. C. 阿尔然尼可夫 著
B. H. 马尔采夫

高等教育出版社

高等学校教学用书



空气动力学

H. C. 阿尔然尼可夫 著
B. H. 馬尔采夫
張炳暄等譯

(修訂本)

高等教育出版社

本書原系根据苏联国防工業出版社 (Государственное издательство оборонной промышленности) 出版、阿尔然尼可夫 (Н. С. Аржанников) 和馬尔采夫 (В. Н. Мальцев) 合著“空气动力学” (Аэродинамика) 1952 年版譯出, 現按原書 1956 年第二版修訂。原書經苏联高等教育部审定为高等航空学校教科書。

原書系按照苏联高等教育部批准的航空学院用教学大綱写成, 是理論空气动力学的教科書。第一部分論述不可壓縮流体空气动力学的基本概念和原理。第二部分論述高速空气动力学(气体动力学)。

本書适用于航空学院高年級的学生, 也适合于航空工厂和設計部門中工程技术人员参考。

参加本書第一至八章譯校工作的有張炳暄、張桂联和王震华, 参加本書第九至十九章譯校工作的有張炳暄和沈元。按原書 1956 年版修訂的是張炳暄。

本書旧版原分上下兩册出版, 現合訂为一册。

空 气 动 力 学

Н. С. 阿尔然尼可夫 В. Н. 馬尔采夫著

張炳暄等譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京华印書局印刷 新华書店發行

統一書号 15010·689 開本 850×1168 1/32 印張 16 5/16

字數 406,000 印數 0001—1,000 定價 (10) ¥2.40

1954 年 7 月上册第 1 版(共印 6,500)

1955 年 1 月下册第 1 版(共印 5,500)

1959 年 1 月合訂第 1 版(修訂本) 1959 年 1 月北京第 1 次印刷

序

在荣获列宁勋章的、以奥尔忠尼启则命名的莫斯科航空学院飞机制造系所講授的“空气和气体动力学”教程,是 1952 年出版的本書第一版的基础。由于飞机速度的增長,航空科学而尤其是空气动力学,無論在实验或理論研究方面,都获得了非凡的發展。因此,最近几年来,“空气和气体动力学”課程的教学大綱也有很显著的变动,反映了在理論空气动力学和实验空气动力学領域中最新的研究成就。

在准备第二版时,作者考虑了所得的意見和批評,并对个别地方稍加修正。本書是按教学大綱写成的,供航空学院飞机製造系学生使用,但它同时对同类專業的学生也是一本有益的書,并且可作为航空工厂設計局和科学研究所中工作人員的参考書。

作者向評閱者——布拉果(Г. Ф. Бураго)教授、伏加考夫(В. Д. Вотяков)副教授、技术科学副博士舒米雅茨基(Б. Я. Шумяцкий)致深切的謝意,他們在审閱第二版手稿时曾給予宝贵的指示。

同时作者也感謝技术科学副博士科特略尔(Я. М. Котляр)和薩捷可娃(Г. С. Садекова)对本書付印前准备工作所給予的帮助。

作者將非常感謝所有提出任何意見或指出个别缺点的同志們,因为这样有助于进一步改进此書。

緒 言

空气动力学是研究不可压缩流体和可压缩流体(可包括空气)运动规律的科学。

空气动力学的对象是:研究空气运动的规律,研究空气在其所流经的物体上的作用力。

将空气看作不可压缩流体来研究,就使得空气动力学中有了一系列与流体动力学共同的定律、方法和方程式,因为流体动力学是研究不可压缩流体的运动规律的。因此,空气动力学的这一领域常常称为流体空气动力学。

飞机以高速度来飞行,是现代航空上的特点。当飞机速度高到能与音速相比拟时,空气的可压缩性严重地影响其运动特性。因此,高速空气的运动规律,就与低速的运动规律不相同。高速空气动力学常常称为气体动力学,是一门研究可压缩流体(气体)运动的科学。

空气动力学是航空的理论基础,也是现代飞机和其他飞行器的基本气动力计算的基础。

目 录

序	viii
緒言	1
第一章 历史概述	2
§ 1. 十七世紀到十九世紀流体空气动力学發展的历史簡述	2
§ 2. 儒可夫斯基和恰普雷金在近代空气动力学發展中的作用	11
§ 3. 苏联科学家在空气动力学發展中的主导作用	10
第二章 流体空气动力学的基本概念	24
§ 1. 流体的概念、質量密度和重量密度	24
§ 2. 流体的分类	26
§ 3. 流体給定点上的流体动力压力的概念	30
§ 4. 流体中作用力的分类	31
§ 5. 理想流体中流体动力压力与方向无关	32
第三章 流体运动学	38
§ 1. 欧拉法	38
§ 2. 拉格朗日法	35
§ 3. 流体运动的分类	36
§ 4. 流綫	38
§ 5. 連續方程式	42
§ 6. 速度环量	46
§ 7. 流体微团的运动	48
§ 8. 位势流	55
§ 9. 笛卡兒坐标中, 位势流的連續方程	57
§ 10. 平面極坐标中, 不可壓縮流体位势流的連續方程	59
§ 11. 位势流中的速度环量	60
§ 12. 流函数	62
§ 13. 位势流疊加法	65
§ 14. 均匀直綫流动	67
§ 15. 直角內的流动	68
§ 16. 点源和点匯	70
§ 17. 偶極子	73
§ 18. 旋渦	76

§ 19. 繞过圆柱体無环量的流动	79
§ 20. 繞过圆柱体帶环量的流动	83
第四章 理想流体的流体动力学基础	86
§ 1. 理想流体的欧拉运动微分方程	88
§ 2. 理想流体的葛罗米柯运动微分方程	90
§ 3. 起始条件和边界条件	92
§ 4. 运动微分方程的积分	94
§ 5. 理想流体定型运动用的冲量方程	100
第五章 旋渦理論的基础	102
§ 1. 渦綫的概念	103
§ 2. 渦管	104
§ 3. 斯托克斯定理	105
§ 4. 环量不变的湯姆遜定理	108
§ 5. 海姆霍茲的几个旋渦定理	111
§ 6. 二元旋渦內部和外部的压力分布情况	115
§ 7. 畢奧—薩瓦耳关于旋渦影响的公式	118
§ 8. 决定一般情形下旋渦影响的問題	120
§ 9. 欧拉—达朗伯疑題	123
§ 10. 儒可夫斯基定理	125
§ 11. 对于任意平面外形的儒可夫斯基定理的証明	128
第六章 复变函数的理論, 应用来研究理想流体的二元流动	133
§ 1. 复位势	138
§ 2. 复速度	134
§ 3. 几个最簡單的流动例子	135
§ 4. 一对旋渦的运动	142
§ 5. 渦綫	145
§ 6. 渦街的概念	146
§ 7. 繞过圆柱体的流动	147
§ 8. 复速度的留数	149
§ 9. 儒可夫斯基—恰普雷金压力合力的定理	151
§ 10. 恰普雷金压力合力的力矩定理	154
第七章 二元机翼理論	159
§ 1. 保角变换的概念	159
§ 2. 几个最簡單的保角变换的例子	163
§ 3. 反形变换	167
§ 4. 儒可夫斯基变换	171
§ 5. 儒可夫斯基—恰普雷金翼型	173

§6. 决定儒可夫斯基—恰普雷金理论翼型的举力的大小	175
§7. 几种理论翼型	182
§8. 计算任意形状翼型的力及力矩	186
§9. 薄翼理论	192
§10. 确定绕任意形状翼型的位势流(努仁法)	200
第八章 射流和旋涡阻力理论	203
§1. 流经物体的射流流型,有射流形成的流经平板的流动	204
§2. 旋涡阻力的概念	212
第九章 粘性流体运动理论的基础	218
§1. 不可压缩粘性流体的运动微分方程	218
§2. 流动相似的概念	226
§3. 相似的基本准则	231
§4. 圆管中粘性流体的层流	236
§5. 紊流的概念	241
§6. 二元管和圆管中的紊流	248
第十章 附面层	255
§1. 附面层的概念	255
§2. 附面层微分方程	258
§3. 附面层的积分关系式	264
§4. 二元平板上层流附面层的计算	268
§5. 二元平板上紊流附面层的计算	274
§6. 二元平板上混合附面层的计算	277
§7. 曲面上的附面层	280
§8. 曲面层流附面层的计算(洛强斯基法)	286
第十一章 有限翼展机翼理论	296
§1. 有限翼展机翼的流体动力模型	296
§2. 有限翼展机翼的下洗流和诱导阻力的概念	299
§3. 诱导速度和下洗流 $[\Gamma = \Gamma(z)]$	302
§4. 作用在机翼上的力。诱导阻力 $[\Gamma = \Gamma(z)]$	304
§5. 有限翼展机翼的基本积分微分方程	306
§6. 沿机翼翼展环量分布的近似算法	308
§7. 决定机翼的举力及诱导阻力。由一个展弦比的无扭转机翼换算到另一个的公式	318
§8. 具有最小诱导阻力有限翼展机翼的平面形状	318
§9. 用努仁法来解机翼的积分微分方程	322
第十二章 气体动力学的基本概念	326

§1. 气体的状态方程	326
§2. 热力学第一定律	327
§3. 比热	328
§4. 热焓	331
§5. 热力学第二定律·熵	332
§6. 音速	334
第十三章 气体动力学的基本微分方程组	337
§1. 问题的提法与气体动力学基本方程	337
§2. 能量方程	339
§3. 不可压缩流体的柏努利方程应用在空气上的限度	343
第十四章 一元等熵气体流动	347
§1. 一元等熵气体流动的基本关系式	347
§2. 气体流动的速度与气流形状的关系	355
第十五章 正激波理论	363
§1. 正激波的一些基本关系式	363
§2. 正激波时的压缩与等熵压缩的比较	373
§3. 压力波的传播音速·音波	378
§4. 正激波后驻点上的压力	378
第十六章 二元超音速气流	381
§1. 二元等熵气流有位势的准则	381
§2. 二元气体位势流的基本微分方程	384
§3. 气流平面上的特性线	386
§4. 速度平面上的特性线	389
§5. 利用等熵椭圆,按照给定的速度矢量,来决定气流平面上和速度平面上特性线的方向	397
§6. 用特性线法来决定二元超音速气体的位势流的速度场	399
§7. 经凸钝角的超音速流动(普朗特-梅耶尔流动)	405
第十七章 斜激波理论	411
§1. 斜激波的概念	411
§2. 确定斜激波后面的气体参数	413
§3. 超音速气流折转角和斜激波波前的位置的关系	415
§4. 激波极线	417
第十八章 亚音速气流中翼型和机翼的理论	422
§1. 临界 M 数(M_{cr})的概念	422
§2. 亚临界区域内翼型的近似理论(线化法)	424
§3. 用来研究高亚音速气体流动的恰普雷金方程	430

§ 4. 赫利斯奇阿諾維奇方法.....	434
§ 5. 繞任意翼型亞音速流动的布拉果近似理論.....	442
§ 6. 跨临界区域内繞翼型的流动. 布拉果波阻力計算法.....	450
§ 7. 跨临界区域内翼型的空气动力特性.....	454
§ 8. 压縮性对于机翼誘导速度的影响.....	459
§ 9. 可压縮流体亞音速流动中的有限翼展机翼.....	462
第十九章 超音速气流中翼型及机翼理論的基础	473
§ 1. 沿硬边界面上, 綫化超音速的气体压縮与膨脹流动的概念.....	473
§ 2. 超音速流动流經平板的綫化理論.....	480
§ 3. 超音速流动流經薄翼的綫化理論.....	482
§ 4. 超音速流动中較准确的翼型理論.....	487
§ 5. 关于超音速气流流經由直綫段所組成的翼型問題的精确解.....	498
§ 6. 当平板側滑于超音速气流中, 作用在無穷長平板上的气动力.....	496
§ 7. 处理超音速流动中有限翼展机翼的問題.....	500
§ 8. 菱形平面机翼.....	504
参考書刊	509

緒 言

空气动力学是研究不可压缩流体和可压缩流体(可包括空气)运动规律的科学。

空气动力学的对象是:研究空气运动的规律,研究空气在其所流经的物体上的作用力。

将空气看作不可压缩流体来研究,就使得空气动力学中有了一系列与流体动力学共同的定律、方法和方程式,因为流体动力学是研究不可压缩流体的运动规律的。因此,空气动力学的这一领域常常称为流体空气动力学。

飞机以高速度来飞行,是现代航空上的特点。当飞机速度高到能与音速相比拟时,空气的可压缩性严重地影响其运动特性。因此,高速空气的运动规律,就与低速的运动规律不相同。高速空气动力学常常称为气体动力学,是一门研究可压缩流体(气体)运动的科学。

空气动力学是航空的理论基础,也是现代飞机和其他飞行器的基本气动力计算的基础。

第一章 历史概述

§ 1. 十七世紀到十九世紀流体空气 动力学發展的历史簡述

簡要地說明流体空气动力学的历史發展，这首先就是去闡述流体空气动力学中最主要的問題——确定流体作用在其中运动着的物体上的阻力——的历史。

第一批阻力理論的成就是在十七世紀，当时由于研究落体規律和摆的需要而引起，摆在那时是作为測量時間的工具。然而，这些問題的研究，对証实哥白尼地球旋轉的学說也是必需的。

十七世紀末以前，亞里斯多德的观点統治着科学：假定落体的時間反比于落体的重量，亦即重物体比輕物体落得快。1638年，伽利略在比薩大教堂做了落体試驗，首先駁倒了亞里斯多德的学說。依茹依脫·黎契奧利（Иезуит Риччиоли）企圖用聖經来証明哥白尼学說的不真实，1640—1650年間他在波倫涅（Болонье）地方阿齐聶尔塔上重复了这些試驗，但出乎意外地發現，这些試驗却証实了伽利略的結果。

由于試驗的結果，伽利略在历史上首先指出了，在流体介質中运动物体所受的阻力，随着介質的密度和速度的增大而增加。

伽利略对阻力的大小，未作数量上的估計，在1686年，科学家馬利奧脫（Марриот）首先作了数量上的估計，确定了放在河中而与水流方向相垂直的矩形平板上的阻力。

十七世紀末和十八世紀初，英国科学家依薩克·牛頓（1642—1727年）对阻力問題作了很多的研究。

牛頓研究了在不同介質中球的落下，確立了球的阻力 Q 比例于 $\rho v^2 D^2$ 的大小，其中 ρ ——介質的密度， v ——球的運動速度，而 D ——球的直徑。這樣，就發現了阻力的基本定律：

$$Q = C \rho S v^2,$$

對球來說，量 $C = 0.50$ ，這與近代的数据符合得還不壞。

與實驗研究阻力的同時，牛頓還創立了運動固體與並不存在的假想流體間相互作用的理論。這些圖式化了的流體模型，與實際流體在性質上很多方面並不相同，牛頓研究這些流體模型，是為了證明星際空間並不充塞着任何介質，而其存在原是由不正確的亞里斯多德理論推出來的。

牛頓特別詳細地研究了由各別質點（微粒）組成的沒有摩擦的假想稀薄流體的運動。適應於這運動，牛頓創立了所謂平板阻力衝擊理論，這裡平板是在某沖角下運動的。牛頓認為，流向平板的流動，是由大量無彈性的剛性微粒組成，這些微粒撞在板上，完全喪失了自己的速度。應用動量定理，他確定了阻力的大小。設平板的面積是 S ，單位時間內以沖角 α 流向平板的流體質量等於 $\rho S v \sin \alpha$ ，而垂直於平板的流體微粒的速度則是 $\rho v \sin \alpha$ ，該速度在流體衝擊平板時完全喪失，這樣，牛頓就得到垂直於平板表面的阻力 R 的公式如下：

$$R = \rho S v^2 \sin^2 \alpha.$$

牛頓死後，很多科學家企圖把這理論應用到空氣中物體的運動上去，結果不可避免地得出了不正確的結論。

按照“正弦平方”定律算出的機翼舉力，得到的數值是這樣的小，以致在長時期中曾經用此來證明重於空氣的機器不能飛行。

十八世紀阻力學說的發展，主要受航海、水利學和火炮發展的影響。

在解決火炮的問題上，需要確切地知道炮彈的阻力。因此，在

1746年,英国科学家罗宾(Робин)安排了确定球阻力的試驗,为此,他采用了能帶着球旋轉的迴轉机器。荷重 P 的重量選擇得使球的旋轉是均匀的。在此情形下就有力矩等式 $WR=Pr$,其中 W 是球的阻力; R 和 r 是对应的力臂。然后把球取下,再選擇一最小的荷重 p ,使能給出与第一种情形下荷重 P 时同样的轉速,結果,阻力可由下式确定

$$W = (P - p) \frac{r}{R}.$$

罗宾得到的球的阻力系数 C ,等于0.55。

罗宾的方法在阻力研究中,因而也在空气动力学历史中起过很大的作用,在風洞出現之前,一直作为求阻力的基本方法。

1763年,法国艦队的艦長,著名的科学家保尔达(Борда)运用罗宾的方法,作了許多試驗来确定水中和空气中各种物体(球、平板、圓柱体)的阻力。

保尔达証实了牛頓平方阻力定律,但同时指出牛頓冲击理論并不正确,因为这个理論与他作的所有試驗結果都不符合,保尔达的偉大功績就在于此。

航海的发展提出了确定船的阻力問題,迫使科学家們更仔細地从事阻力問題的研究。

十八世紀七十年代,因为要設計整个狹运河網的建設工程,巴黎科学院提出了下面的問題,阻力在何种程度上决定于船的截面与运河截面間的关系。为了研究这問題,曾組織了一个特殊委员会,由有名的力学家达朗伯担任主席,成員有康多尔赛(Кондорсе)和保胥(Бюссю)。

在1775—1777年間,他們在矩形容器中作拖曳模型的試驗,这打下了广泛采用这种实验的基础,如今已演变成在特制水槽中拖曳快艇、船只、水上飞机模型的实验法。

康多爾賽和保育在 1778 年作了專門研究，來校驗阻力比例于冲角正弦平方的牛頓定律。他們從 69 個試驗中，証實了保爾達關於牛頓理論並不正確的結論。

著名的俄羅斯科學家門德列也夫(Д. И. Менделеев)在這方面說道^①：“在阻力問題历史中，這種結論就是使牛頓理論破產和需要尋找新的阻力規律的主要原由。”

應當在此提一下英國科學家保富阿(Боффа)的著作。在英國，造船業特別發展，自然對研究阻力理論產生極大興趣。1793—1798 年間，保爾達作了大量試驗，用來確定飄浮物與沉入流體中物體的阻力。為此，曾組織了專門的協會“Society for the Improvement of Naval Architecture”(造船業改良協會)，使保爾達能夠在倫敦附近格陵蘭船塢的寬廣水池中，用大模型來做實驗，這些試驗最為有名。保爾達所得的下面結果特別使人感興趣：他確定了球的阻力，找到其阻力係數 $C=0.36$ ，而在此以前的所有實驗者，均得 $C \approx 0.50$ [牛頓—0.50，保爾達—0.56，胡頓(Хуттон)—0.60]。這裡有差別的原因在於，早先的實驗是在繞球流動系層流的這種速度下進行的，而保爾達則在紊流狀態下測量了阻力。在十九世紀中葉，著名的科學家泊稷葉和雷諾詳細地研究過這結果，發現流體運動實有兩種流態——層流和紊流。

在阻力理論研究方面，庫倫和裴布阿(Дюбуа)的研究具有很大的價值。庫倫的功績在於怎樣對待摩擦阻力的問題。牛頓等人認為摩擦很小，而達朗伯，康多爾賽和保育在他們的研究中力圖証實其的確很小，但庫倫卻認為，阻力可表成兩項之和 $av^2 + bv$ ，其中第二項決定於摩擦。

庫倫假設，速度小時第二項起決定性的作用，而速度大時則剛

^① “О Сопротивлении жидкостей и воздухоплавании” Сочинение Т. VII
изд. АН СССР, 1946.

好相反，第二項可忽略。庫侖作了大量試驗，研究流体中盤的扭轉振動。他確立了流体中摩擦和固体摩擦的不同點，並且提出了決定流体摩擦大小的方法，這種摩擦，斯托克斯(Стокс)、麥克斯韋爾(Максвелл)、梅耶爾(Мейер)等稱之為內摩擦。庫侖的試驗，使斯托克斯有可能來論證粘性流体的基本運動微分方程(1850年)。

法国科学家裘布阿力求確立新的阻力学說。在他的著作“Principles d'hydraulique”(水力学原理)(1779年巴黎)中，描述了一系列的試驗，並且說：“我們很幸运，因為我們能够把運動物体在流体中受到的阻力，分解為兩種不同的力：一種力是在物体前緣部分压力作用的結果，而另一種力是由于后面压力不够。假使物体前緣的形狀和大小保持不变，第一項是一定值，第二項則随物体長度而变，永远与后緣形狀無關地随着長度增大而减小，当然，后緣形狀本身也会影响到后面的亏压(недавление)的大小。”英国人用了这种想法，也开始把所有阻力分为后緣的和前緣的阻力，在上面提到过的保尔达的研究中，特別清楚地表現了这一点。

裘布阿引出了与牛頓根本不同的新的阻力学說，这學說的特点是釋明了物体后緣部的作用。

門德列也夫指出：“裘布阿第一个清楚地覺察到，并企圖解釋和表述出摩擦的影响，長度的影响以及阻力学說的許多其他的細節。在我看来，这位研究者是正确解决阻力問題的首倡人。”

假使在裘布阿之前，阻力主要是由重量法來確定(無論是拖曳法或羅賓的圓周旋轉法，均基于直接測量力)的話，則裘布阿第一个引用了通氣法來研究沿物体表面的压力分布。他采用了底托管作為压力接受器，底托管是底托在 1753 年提出用來測量河流流速的。無疑地，這也是裘布阿偉大的历史功績。

裘布阿的出名還在于他發現了現在大家所熟知的疑題，在運動流体中靜止平板的阻力，大于靜止流体中運動平板的阻力，其比

例是 1.3:1, 这疑題即以他的名字来称呼。

儒可夫斯基(Н. Е. Жуковский)解釋了此疑題, 認為是由于靜止平板与运动平板繞流条件不同的緣故。

十八世紀中叶, 在俄罗斯展开了对流体运动的理論研究, 打下了理論流体动力学的基础。創立理論流体动力学的荣誉, 属于以兩位院士——列奥那尔·欧拉(Леонард Эйлер)(1770—1783年)和达尼尔·柏努利(Даниил Бернулли)(1700—1783年)为代表的俄罗斯科学院。

欧拉在其卓越的著作“流体运动的一般原理”(1775年)中, 第一个导出了所謂理想流体的基本运动微分方程, 給連續介質力学中最重要的一門——流体动力学——打下了基础。

流体空气动力学应归功于欧拉, 他引入了压力的概念, 与流体“撞击”被繞流物体表面的牛頓概念完全相反。

柏努利發現了流体动力学的基本定律, 該定律發表在他的著作“流体动力学”(1738年)內, 它确立了不可压缩流动中压力与速度的关系, 而現今已推广到可压缩流体的情形中去了。

偉大的俄罗斯科学家罗蒙諾索夫(1711—1765年), 在其著作“空气彈力的研究”中, 曾根据了空气的分子構造, 来研究空气的基本特性。

以这些研究为基础, 罗蒙諾索夫完成了直升飞机的設計, 供帶着他自制的气象研究仪器升入高空用。因而, 罗蒙諾索夫在世界上第一个作了有严格科学根据的尝试, 企圖創造重于空气的飞行器。

在著名的法国科学家拉格朗日的著作中, 流体动力学的分析方法得到了进一步的發展, 他給出了新的流体动力学微分方程的形式, 并且建立了位势流的理論。

达朗伯用理論确定了理想流体位势流繞經物体时的阻力, 得